3D skeniranje fizičnih objektov: primerjava fotogrametrije in laserskega triangulacijskega skeniranja

Jakob Tomas Bolta, Tomaž Terčič, Iztok Humar

Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, Ljubljana, Slovenija
E-pošta: tomaz.tercic@fe.uni-lj.si

3D Scanning of Physical Objects: A Comparison of Photogrammetry and Laser Triangulation

Abstract. *This article compares two popular 3D scanning methods: photogrammetry and laser triangulation. Accurate and detailed 3D digitization of physical objects is essential across a wide range of applications, including industrial quality control, reverse engineering, cultural heritage preservation, and product design. The aim of this study is to evaluate the performance of both methods in terms of scanning accuracy and practical applicability. Using a real-world test object scanned with both methods, we evaluate the results based on standard criteria such as geometric accuracy, surface resolution and ease of use.*

1 Uvod

3D digitalizacija fizičnih objektov je v zadnjih letih postala ena ključnih tehnologij za analizo geometrije, simulacije, nadzor kakovosti, reverzno inženirstvo, medicinske aplikacije ter dokumentiranje kulturne dediščine [1]. Z razvojem cenovno dostopnih senzorjev se je uporaba 3D skeniranja razširila iz industrijskih laboratorijev tudi v širšo raziskovalno in komercialno uporabo [2].

Med najpogosteje uporabljenimi pristopi za 3D digitalizacijo sta fotogrametrija in laserska triangulacija. Prva temelji na rekonstrukciji 3D geometrije iz več prekrivajočih se 2D slik in je priljubljena predvsem zaradi nizkih stroškov, enostavne uporabe in široke dostopnosti, saj jo je mogoče izvajati tudi z običajnimi pametnimi telefoni. Na drugi strani se aktivni optični sistemi, kot so laserski in strukturirano-svetlobni skenerji, zanašajo na kontroliran vir svetlobe, ki se projicira na objekt, pri čemer se 3D geometrija izračuna na podlagi deformacije projiciranega signala. Zaradi teh razlik je smiselna primerjava obeh pristopov na istem preskusnem objektu, saj omogoča objektivno oceno njunih zmogljivosti v kontroliranih pogojih. Na ta način je mogoče ovrednotiti ne le geometrijsko natančnost, temveč tudi praktične omejitve posamezne metode pri zajemu kompleksnih geometrijskih struktur. V člankih [1], [2], [3] in [4] sta obravnavani tehnologiji že primerjani, vendar se uporabljeni pristopi k vrednotenju njune geometrijske zmogljivosti razlikujejo od pristopa, uporabljenega v tej raziskavi. V nadaljevanju sta predstavljena uporabljena postopka ter rezultati njune primerjave na standardiziranem preskusnem objektu.

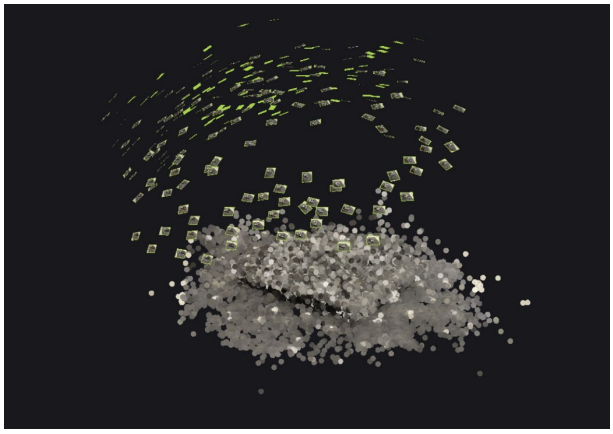
2 Ozadje

2.1 Laserska triangulacija

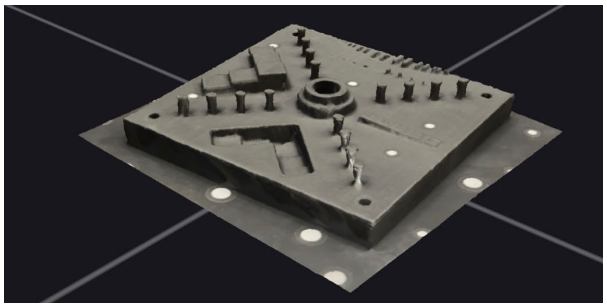
Laserska triangulacija je aktivna optična metoda 3D skeniranja, pri kateri se na površino objekta projicirajo laserske linije. Njihov položaj na površini zaznava kamera, ki je glede na os laserske projekcije nameščena pod znanim triangulacijskim kotom. Zaradi sprememb geometrije površine se položaj projiciranih linij na slikovnem tipalu kamere spreminja. Na podlagi predhodno določene geometrijske konfiguracije sistema in kalibracijskih parametrov se z uporabo triangulacijskega algoritma izračunajo prostorske koordinate točk na površini objekta, kar omogoča rekonstrukcijo tridimenzionalnega modela. Takšen način zajema omogoča hkratno pridobivanje več profilov površine, s čimer se poveča gostota izmerjenih točk in skrajša čas skeniranja. Modri laserji zaradi krajše valovne dolžine omogočajo natančnejše zaznavanje drobnih geometrijskih podrobnosti ter so manj občutljivi na vplive zunanje osvetlitve in optičnih lastnosti površine v primerjavi z laserskimi sistemi, ki uporabljajo daljše valovne dolžine [3].

2.2 Fotogrametrija

Fotogrametrija je pasivna metoda 3D rekonstrukcije, ki temelji na analizi več prekrivajočih se fotografij objekta, posnetih iz različnih zornih kotov. Osnovni princip temelji na računalniškem ujemanju značilk med slikami in uporabi geometrijskih odnosov za izračun položaja točk.



Slika 1: prikaz lokacij zajetih 300 fotografij v aplikaciji RealityScan. Vir: lasten arhiv



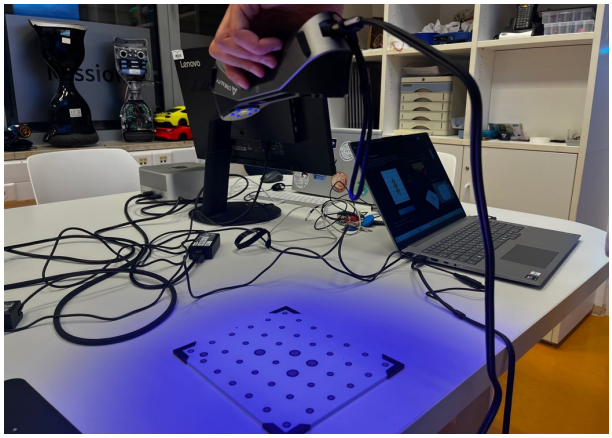
Slika 2: prikaz fotogrametrije v aplikaciji RealityScan. Vir: lasten arhiv

2.3 Pregled zasnove študije

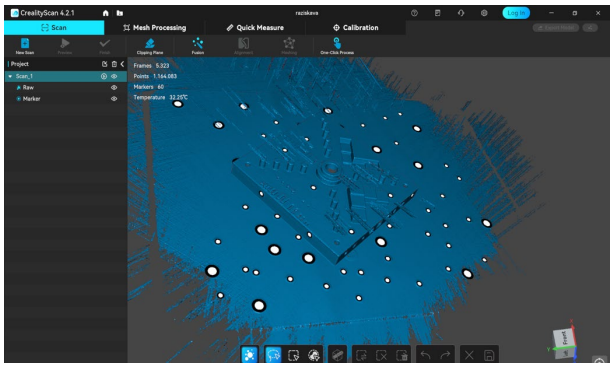
Glavni cilj raziskave je kvantitativno ovrednotiti razlike med obema pristopoma glede geometrijske natančnosti, kakovosti rekonstrukcije in praktične uporabnosti. S tem želimo prispevati k boljšemu razumevanju prednosti in omejitev posameznih metod.

2.4 Oprema

Pri postopku laserske triangulacije smo uporabili 3D skener Creality CR-Scan Raptor, ki za zajem geometrije uporablja sedem modrih laserskih linij. Pred začetkom skeniranja je bilo potrebno izvesti umerjanje 3D skenerja, kot je prikazano na sliki 3. Umerjanje je bilo izvedeno z uporabo priložene kalibracijske plošče, ki smo jo zajeli v več različnih položajih. Na podlagi teh zajemov je programska oprema določila notranje parametre kamer ter relativno geometrijo med kamerama in laserskim projektorjem, kar je ključno za natančno triangulacijsko rekonstrukcijo. Skeniranje smo izvedli šele po uspešno opravljenem umerjanju.



Slika 3: umerjanje 3D skenerja Creality Raptor. Vir: lasten arhiv

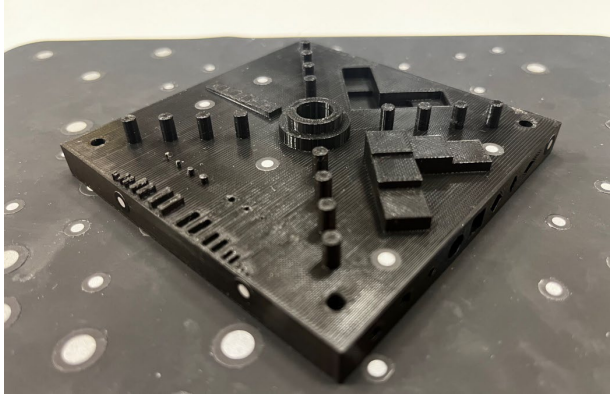


Slika 4: prikaz laserske triangulacije v programu Creality Scan. Vir: lasten arhiv

Pri postopku z uporabo fotogrametrije smo uporabili pametni telefon Apple iPhone 13 mini in aplikacijo RealityScan, ki temelji na fotogrametrični rekonstrukciji 3D modelov iz digitalnih fotografij. Zajem je bil izveden z brezplačno različico aplikacije, ki omogoča uporabo največ 300 fotografij na posamezen projekt. Kamera telefona z ločljivostjo 12 MP omogoča zajem fotografij z zadostno kakovostjo za rekonstrukcijo geometrije manjših objektov, medtem ko aplikacija samodejno obdela zajete slike in izdela tridimenzionalni model. Prednost takšnega sistema je njegova cenovna dostopnost in enostavna uporaba, saj za zajem geometrije ne zahteva namenske merilne opreme. Kakovost končnega modela je pri tem odvisna predvsem od kakovosti zajetih fotografij, njihovega medsebojnega prekrivanja, osvetlitvenih pogojev in teksture površine objekta. Nekateri parametri so predstavljeni v spodnji tabeli.

Parametri	**Vrednosti**
ISO	500
Čas osvetlitve	1/50 s
Oddaljenost telefona od merjenca	30-40 cm

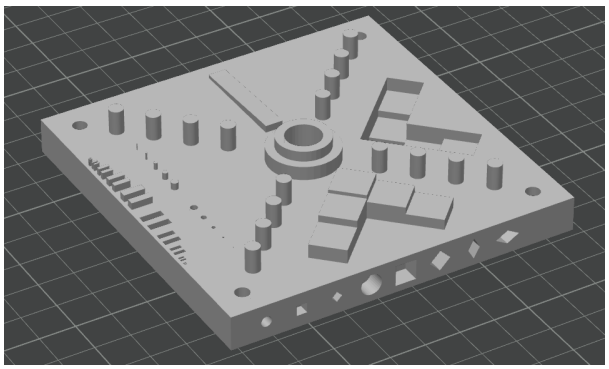
Tabela 1: parametri zajema slik s pametnim telefonom.



Slika 5: priprava okolja za skeniranje s pametnim telefonom in aplikacijo RealityScan. Vir: lasten arhiv

2.5 Izbira ustreznega 3D modela

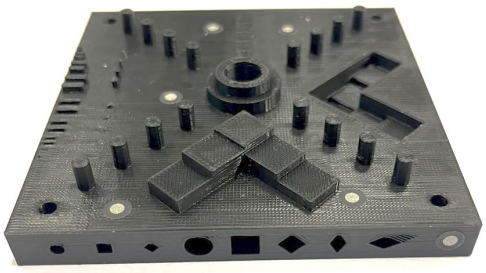
Uporabili smo standardiziran testni objekt Additive Manufacturing Test Artifact, ki ga je objavil NIST (National Institute of Standards and Technology) [5]. Gre za pogosto uporabljen referenčni 3D model v raziskavah 3D skeniranja, saj vsebuje dobro definirane geometrije in omogoča ponovljivo ter kvantitativno oceno rezultatov. Izbrani 3D model vključuje različne osnovne geometrijske elemente, kot so ravnine, cilindri, luknje, stopničaste strukture in nagnjene površine, kar je razvidno iz slike 6.



Slika 6: standardiziran referenčni model. Vir: lasten arhiv

3 Rezultati

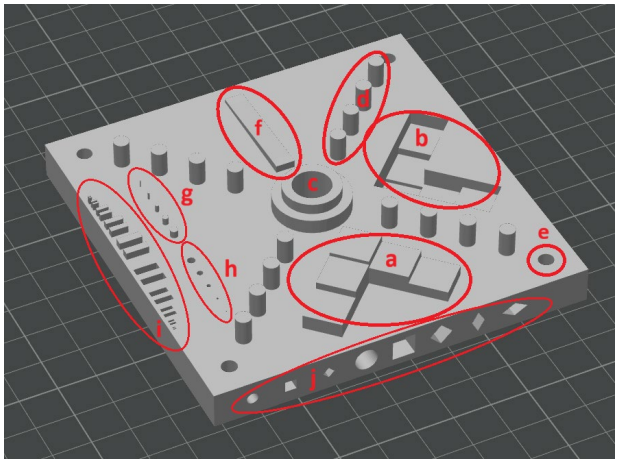
Za evalvacijo kakovosti rekonstruiranih 3D modelov smo referenčni model natisnili s 3D tiskalnikom BambuLab P1S s privzetimi nastavitvami. Uporabljen je bil profil tiska z višino sloja 0,12 mm (Fine @BBL X1C) in material oz. filament PLA črne barve.
Zunanja dimenzija 3D natisnjenega referenčnega modela odstopa od originala oz. STL datoteke za 0,16 mm.



Slika 7: 3D natisnjen standardiziran referenčni model. Vir: lasten arhiv

3.1 Ocenjevalni elementi

Izbrani elementi, označeni na sliki 8, vključujejo ravne ploskve, stopničaste prehode, pozitivne in negativne valjaste strukture ter ozke reže. Takšna kombinacija omogoča oceno različnih vidikov kakovosti rekonstrukcije, kot so ohranjenost robov, natančnost dimenzij, sposobnost zajema notranjih geometrij ter stabilnost pri rekonstrukciji finih detajlov. Element j je bil namenoma izpuščen iz primerjave, saj je zaradi omejitev tehnologije v obeh primerih slabo zajet.



Slika 8: prikaz izbire ocenjevalnih elementov referenčnega modela. Vir: lasten arhiv

3.2 Laserska triangulacija

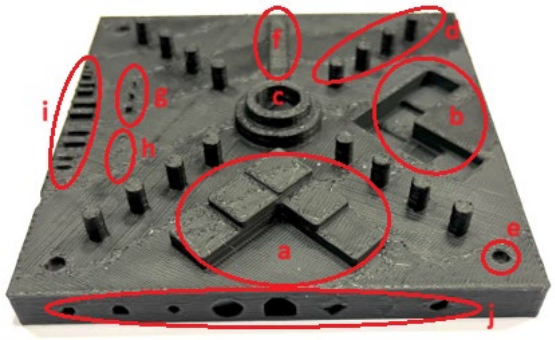
Na podlagi rezultatov iz tabele 2 je razvidno, da laserska triangulacija (CR-Scan Raptor) zagotavlja stabilen in zanesljiv zajem analiziranih geometrijskih struktur. Pri večjih geometrijskih elementih (a, b) so površine ohranjene gladke, robovi pa ostro definirani, kar kaže na dobro reprodukcijo ortogonalnih prehodov. Stopničasta struktura (f) je bila rekonstruirana zvezno in geometrijsko ustrezno, pri čemer so prehodi med posameznimi stopnicami ostali jasno izraženi in pod pravim kotom, brez opaznega glajenja robov.

Geometrijski element (slika 9)	Laserska triangulacija (CR-Scan Raptor)
Pozitivni zatiči (d) (5 elementov: 2,0 mm → 0,4 mm)	Vsi vidni (5/5). Geometrijsko točni in ostri robovi. Meja: ≤ 0,4 mm
Mini stolpci (f) (5 elementov: 2,0 mm → 0,4 mm)	Vse strukture vidne (5/5). Gradient jasno izražen, prehodi so čisti. Meja: ≤ 0,4 mm
Komplementarni stebriči (g) (4 elementi: 2,0 mm → 0,8 mm)	Vidni 3 elementi. Pozitivni volumen je uspešno ločen do premera 1,2 mm, najmanjši se zlije. Meja: 1,2 mm
Komplementarne izvrtine (h) (4 luknje: 2,0 mm → 0,8 mm)	Vidni 2 luknji. Penetracija snopa je uspešna do dimenzije 1,6 mm, pri manjših premerih pa odpove. Meja: 1,6 mm
Stopnjevane reže (i) (5 elementov: 2,0 mm → 0,4 mm)	Delno uspešno. Vidna prva dva segmenta (2,0 in 1,6 mm). Zadnje tri ožje reže so med seboj sprijete. Meja: 1,6 mm

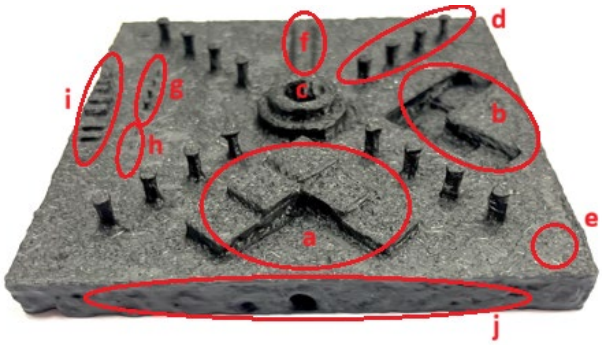
Tabela 2: rezultati laserske triangulacije

Geometrijski element (slika 10)	Fotogrametrija (RealityScan)
Pozitivni zatiči (d) (5 elementov: 2,0 mm → 0,4 mm)	Deformirani stebriči (2/5). Opazna izguba cilindričnosti in topološka popačenja.
Mini stolpci (f) (5 elementov: 2,0 mm → 0,4 mm)	Močna deformacija. Gradient je sicer zaznaven, a so strukture geometrijsko močno popačene.
Komplementarni stebriči (g) (4 elementi: 2,0 mm → 0,8 mm)	Vidni vsi 4 elementi. Vsi volumni so zaznani (do 0,8 mm), vendar z zmanjšano geometrijsko točnostjo in prisotnim šumom.
Komplementarne izvrtine (h) (4 luknje: 2,0 mm → 0,8 mm)	Ni vidnih izvrtin (0). Popolna odpoved detekcije celo pri največji negativni komplementarni geometriji (2,0 mm).
Stopnjevane reže (i) (5 elementov: 2,0 mm → 0,4 mm)	Odpoved geometrije. Stolpiči med režami so med seboj sprijeti. Luknje so jasno nakazane le v prvih dveh segmentih.

Tabela 3: rezultati fotogrametrije



Slika 9: 3D natisnjen rezultat laserske triangulacije. Vir: lasten arhiv



Slika 10: 3D natisnjen rezultat fotogrametrije. Vir: lasten arhiv

3.3 Fotogrametrija

Na podlagi rezultatov iz tabele 3 je razvidno, da pri večjih površinah (a, b) prihaja do težav pri določitvi globine, kar se odrazi v rahlo valovitih ploskvah, prisotnosti geometrijskega šuma ter zaobljenih robovih. Pri stopničasti strukturi (f) se zaradi glajenja rekonstruirane mreže izgubijo ostri prehodi, zato stopnice niso več jasno ortogonalne, temveč prehajajo v bolj zvezno, poenoteno površino. Še izrazitejše omejitve se pokažejo pri stranski izvrtini (j), kjer zaradi okluzij in pomanjkanja ustreznih vizualnih informacij v notranjosti geometrije luknja pogosto ni pravilno rekonstruirana, temveč je delno zapolnjena ali močno poenostavljena.

4 Zaključek

Rezultati kažejo, da je aktivni laserski sistem dosegel visoko ločljivost zajema, saj je uspešno razločil pozitivne zatiče in mini stolpce vse do mejne nominalne dimenzije 0,4 mm. Nasprotno je fotogrametrija pri teh dimenzijah odpovedala zaradi izrazitih topoloških popačenj in izgube cilindričnosti. Razlike med metodama so še izrazitejše pri kompleksnejših geometrijah in v območjih negativnega prostora. Laserski skener je uspešno zajel večino izvrtin in rež, medtem ko je fotogrametrija pri komplementarnih izvrtinah in stopnjevanih režah v celoti odpovedala.

Na splošno rezultati potrjujejo, da je laserska triangulacija primernejša za aplikacije, kjer sta ključni geometrijska natančnost in ponovljivost. Fotogrametrija pa ostaja uporabna predvsem v primerih, kjer so pomembnejši dostopnost, enostavnost uporabe in vizualna predstavitev.

Glede na hiter razvoj tehnologije in prihod zmogljivejših 3D skenerjev s križnim vzorcem laserske svetlobe se odpirajo nove možnosti za doseganje večje natančnosti pri zajemu podatkov. Hkrati postajajo vse bolj dostopne in razširjene tudi fotogrametrične rešitve, ki temeljijo na umetni inteligenci. V prihodnje bo zato smiselno ponoviti izvedbo meritev z uporabo novih tehnologij.

Literatura

[1] C. Re, S. Robson, R. Roncella, M. Hess: Metric Accuracy Evaluation of Dense Matching Algorithms in Archeological Applications, 2021. DOI: 10.14311/gi.6.34

[2] O. F. Gebler, M. Goudswaard, B. Hicks, D. Jones, A. Nassehi, C. Snider, J. Yon, University of Bristol: A comparison of structured light scanning and photogrammetry for the digitisation of physical prototypes, 2021. DOI: 10.1017/pds.2021.2

[3] A. Nazim, M. Kondrát, K. Zidek, J. Pitel, Faculty of Manufacturing Technologies with the Seat in Prešov, Technical University of Košice: Methodology of Object Reconstruction by Photogrammetry and Structured-Light Scanning for Industrial 3D Visualisation, 2025. DOI: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/23/7177

[4] M. P. Kowalik, F. Pelowski, I. LIpowiecki, Institute of Aeronautics and Applied Mechanics, Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology: Test and comparison of different digitalization techniques for objects with surfaces difficult to scan, 2025. DOI: https://doi.org/10.12913/22998624/194997

[5] NIST Additive Manufacturing Test Artifact, https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/production-systems-group/nist-additive-manufacturing-test